第 38 卷第 4 期
2018 年 2 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.4
Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701030010
章广琦,张萍,陈云明,彭守璋,曹扬.黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征.生态学报,2018,38(4):1328-1336.
Zhang G Q, Zhang P, Chen Y M, Peng S Z, Cao Y.Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantation ecosystems in the Loess hilly-gully region, China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1328-1336.

黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征

章广琦[1],张 萍[1],陈云明[2,3],彭守璋[2,3],曹 扬[2,3,*]
1 西北农林科技大学林学院,杨凌 712100
2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100
3 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100

摘要:为阐明不同人工林生态系统间生态化学计量特征的差异,采用野外采样与室内分析相结合的方式分析了陕北黄土丘陵区落叶阔叶树种刺槐和常绿针叶树种油松人工林乔木、灌草、枯落物和土壤(土层深度 0—100cm)C、N、P 化学计量特征。结果表明:1)刺槐乔木各器官(叶、枝、干、皮、根)C 含量显著低于油松,但 N 和 P 含量显著高于油松。因此,油松的 C∶N 和 C∶P 显著大于刺槐,而 N∶P 小于刺槐。2)刺槐林下枯落物 N 和 P 含量显著高于油松,但 C 含量显著小于油松。此外,油松林下枯落物 C∶N(70.21)大于刺槐林下枯落物 C∶N(19.71),说明油松林下枯落物分解较慢,有利于养分的存储。3)刺槐和油松人工林土壤 C、N 含量均随土壤深度增加而减少,P 含量则基本保持不变。刺槐人工林土壤中 C 含量低于油松,N、P 含量在两者之间无显著差异。4)刺槐人工林内乔灌草叶、枯落物与土壤 C、N、P 及其计量比的相关性多集中在 10—20、20—30cm 土层,而油松林中各组分与土壤营养元素的相关性相对较小,其中 20—30cm 土层中无显著相关性,说明相比刺槐人工林而言,油松人工林内土壤层 N、P 供应量对植物叶片 N、P 含量影响不显著。本研究为深入了解黄土丘陵区生态系统养分耦合循环机制奠定了基础,同时也为黄土丘陵区的植被恢复工作提供了一定的指导意义。

关键词:化学计量特征;刺槐;油松;人工林;差异性

Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantation ecosystems in the Loess hilly-gully region, China

ZHANG Guangqi[1], ZHANG Ping[1], CHEN Yunming[2,3], PENG Shouzhang[2,3], CAO Yang[2,3,*]
1 *College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*
2 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*
3 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling* 712100, *China*

Abstract: To comprehensively understand the stoichiometric characteristics of different plantation ecosystems, field investigations and laboratory analyses were performed to study the carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) stoichiometries in the arbor, shrub, herb, litter, and soil (soil depth 0—100cm) of the deciduous broad-leaved tree species *Robinia pseudoacacia* and evergreen coniferous tree species *Pinus tabuliformis* plantations in the Loess hilly-gully region, northern Shaanxi, China. The results showed that 1) the C concentrations of arbor organs were significantly lower in *Robin*ia than in the *Pinus* plantations, while the N and P concentrations were significantly higher in *Robin*ia than in the *Pinus* plantations. Thus, the C∶N and C∶P ratios were significantly higher in *Pinus* than in the *Robin*ia plantations, but the

基金项目:国家自然科学基金项目(41371506);国家自然科学青年基金项目(41201088,41601058)
收稿日期:2017-01-03; **网络出版日期**:2017-11-12

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yang.cao@ nwsuaf.edu.cn

N∶P ratio in *Pinus* was less than that in the *Robin*ia plantation. 2) The litter N and P concentrations were significantly higher in *Robin*ia than in the *Pin*us plantations, but the C concentration was significantly lower in *Robin*ia than in the *Pin*us plantations. In addition, the litter C∶N ratio was higher in *Pinus* (70.21) than in the *Robin*ia (19.71) plantations. This indicated that the lower decomposition rate of litter was advantageous to nutrient storage in the *Pinus* plantation. 3) The soil C and N concentrations decreased with increasing soil depth, but the P concentrations remained constant in both plantations. The soil C concentration in *Robin*ia was less than that in the *Pinus* plantation, but no difference was observed in N and P concentrations. 4) The correlations between the C, N, P, and nutrient ratios of the arbor leaf, shrub leaf, herb leaf, litter, and soil in the *Robin*ia plantation were more focused in the 10—20, and 20—30cm soil layers, and these correlations in the *Pinus* plantation were relatively lower, with no significant correlation even in 20—30cm soil layer. This indicated that compared with the *Robin*ia plantation, the supply of N and P had no significant impact on the N and P content of leaf in the *Pinus* plantation. This study establishes the foundation for illuminating the ecosystem nutrient coupling mechanism in Loess hilly-gully region, as well as provides a guiding significance for the vegetation restoration in the Loess hilly-gully region.

Key Words: stoichiometric characteristics; *Robinia pseudoacacia*; *Pinus tabuliformis*; plantation; differences

自 1958 年 Redfield[1] 提出生态化学计量学概念以来,有关碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征的研究在国内外迅速展开。生态化学计量学综合了生物学、物理学和化学的基本原理,利用生态过程中多重化学元素的平衡关系,是研究生态系统中多重化学元素(主要是 C、N、P)计量关系的学科[2]。它把生态学中不同层次的研究理论有机地统一起来,为研究各元素在生物地球化学循环和生态过程中的计量关系及规律提供了一种综合方法。植物结构性元素 C 和限制性元素 N、P 在植物生长发育过程中起着非常重要的作用。研究生态系统植物特别是不同树种中 C、N、P 的相互作用及其化学计量关系,对认识生态系统养分耦合循环特征及其作用机制具有重要的科学意义。

人工林作为世界森林资源的重要组成部分,它在生态环境的恢复和重建以及经济发展中发挥着重要的作用[3],尤其在水土流失严重、土壤瘠薄的黄土高原丘陵区,人工林的作用显得尤为突出。人工林生态系统同其他森林生态系统一样,具有完整的组成与结构,其中交织着复杂的生态学过程,通过研究人工林特别是黄土丘陵区人工林生态系统间化学计量特征的关系,指明其生态系统中养分循环变化过程,对于人工林规划的指导和水土保持工作的开展具有重要意义。目前黄土高原在水土保持植被恢复过程中主要集中于对人工刺槐林的研究并且多在水分平衡和养分循环方面,也有过对刺槐叶片化学计量特征的报道[4-6]。但人工林种类繁多,前人较少关注不同类型人工林生态系统的养分循环特征,不同类型人工林间生态化学计量特征的差异还不明确。一般来说,植物-枯落物-土壤作为生态系统能量流动和物质循环的流动环节和主要存储库,彼此间存在着结构及功能间的紧密联系,不同类型人工林生态系统间它们的关系也可能存在差异[7]。在黄土高原地区,前人较早关注了土壤中的养分含量差异对植被生长和稳定造成的影响[8-9],但运用化学计量学原理来展开的相关研究则处于初期阶段。姜沛沛等[10]以陕西省 3 种主要树种为研究对象,分析比较了不同树种乔木叶片、凋落物与土壤 N、P 化学计量特征,但以不同类型人工林生态系统作为一个整体来探寻植物-枯落物-土壤 C、N、P 化学计量特征之间关系的研究报道较少[11],尤其是生态系统中植被养分循环状况以及不同组分与土壤之间的关系还尚不清楚。研究不同类型人工林植物-枯落物-土壤之间的关系,评价其生态系统间养分循环的差异进而制定合理的植被管理和恢复措施,是当前人工林抚育及经营管理中亟待解决的问题。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabuliformis*)是黄土丘陵区的主要造林树种,分布范围广,水土保持能力强,在黄土高原开发和治理中有重要的作用,比较研究两树种人工林生态系统中化学计量特征的差异具有一定的代表性。基于此,本文以陕北黄土丘陵区宜川县境内刺槐和油松人工林生态系统为研究对象,通过野外采样与室内实验相结合的方式对比分析了刺槐与油松人工林生态系统植物-枯落物-土壤的 C、N、P 生态化学计量特征,探索黄土高原丘陵区不同类型人工林生态系统结构、功能和生产力维持的养分限制与供

应状况,旨在阐明 1)刺槐和油松人工林生态系统间生态化学计量学特征的差异性和 C、N、P 元素间的相互作用及平衡机制关系,2)刺槐和油松人工林生态系统植物-枯落物-土壤生态化学计量学特征间的相关性和养分循环状况。以期丰富西北地区乃至全国的 C、N、P 化学计量特征数据库,为黄土丘陵区植被恢复工作提供一定的指导意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况及样地设置

陕西省延安市宜川县位于陕西省北部(109.41°—110.32°E,35.42°—36.23°N),是典型的黄土丘陵沟壑区。该区属于暖温带半干旱区,具有明显的大陆性季风气候特征,年平均气温 10.3℃,无霜期 185d,年降雨量 521.1mm,且多集中于夏季 7、8 月份。研究区共有林地面积 $25.5\times10^4hm^2$,林木蓄积量 $566\times10^4m^3$,森林覆盖率 54.04%,林草覆盖率 66.37%。主要优势树种有刺槐,油松,白皮松(*Pinus bungeana*)和辽东栎(*Quercus wutaishanica*)等,林下灌木以黄刺玫(*Rosa xanthina*)和黄栌(*Cotinus coggygria*)为主,草本以披针苔草(*Carex lanceolata*)、铁杆蒿(*Tripolium vulgare*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、甘菊(*Dendranthema lavandulifolium*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)和糙苏(*Phlomis umbrosa*)为主。

样地设置与调查于 2013 年 6 月进行,采样点选择在立地条件相似,林相相对整齐,植被分布均匀,生长条件良好的刺槐成熟人工林(27—30a)和油松成熟人工林(45—49a)山地。其中刺槐林下灌木以黄刺玫为主,草本以披针苔草为主;油松林下灌木以黄栌为主,草本以披针苔草为主。每个树种均设置 3 个样地,样地大小为 20m×20m,每个样地内沿对角线分别设置 3 个 2m×2m 的灌木小样方和 3 个 1m×1m 的草本小样方,同时在样方里随机设置 3 个 1m×1m 的枯落物小样方。样地调查中记录样地的海拔、坡向与坡度和样地内树种的树高、胸径及林分密度等信息(表 1)。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic information of sample plot

样地 Sampling plot		坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect/(°)	坡位 Position	海拔 Altitude/m	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	林龄 Age/a	林分密度 Density/(株/hm²)
刺槐样地	1	27	142	上坡	1065.1	10.5	12.7	27	1250
Robinia plot	2	31	147	上坡	1062.6	11	13.3	30	975
	3	28	108	中坡	1056.0	10.5	12.9	29	1100
油松样地	1	28	310	上坡	1060.4	12	14.4	45	1900
Pinus plot	2	26	338	上坡	1060.2	12.5	16.6	49	1350
	3	18	330	中坡	1051.3	12.5	15.9	47	1675

1.2 样品采集与处理

样品采集于 2013 年 6 月进行,依据乔木平均胸径选取 5 株标准木采集各器官(叶、枝、干、皮、根)样品,其中叶均取自当年生的成熟叶片,根分粗根(>2mm)和细根(<2mm)采集。林下灌木和草本采用全收获法采集,灌木分叶、枝、根采集,草本分地上、地下部分采集。采集枯落物的同时,在每个小样方内钻取 1 个 100cm 深(分 0—10、10—20、20—30、30—50、50—100cm 5 层)的土芯。每份样品均采集 300g 左右,带回实验室备用。所有植物和枯落物样品杀青后均在 85 ℃下烘干至恒重后粉碎,土样自然风干磨碎,所有样品过 0.25mm 筛,分别装入塑封袋备用。植物和土壤样品 C、N、P 含量分别采用重铬酸钾硫酸氧化法、半微量凯氏法、酸溶-钼锑抗比色法测定。

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 19.0 对数据进行分析,用 Sigma Plot 10.0 进行绘图。其中,单因素方差分析(one-way ANOVA)用于不同树种间植物和土壤 C、N、P 含量和化学计量特征的差异性检验,显著性水平设置为 $P=0.05$。首先进

行数据方差齐性的检验,若方差为齐性,用 LSD 法进行多重比较;若方差非齐性,则用 Tamhane's T2 法进行多重比较。Pearson 相关分析用于林内植物叶片-枯落物与土壤之间的化学计量特征的相关关系检验。图、表中数据为平均值±标准误。

2　结果

2.1　乔木层各器官 C、N、P 含量及化学计量比

刺槐各器官 C 含量以皮最高(457.12g/kg)、细根最低(308.27g/kg),油松则以枝最高(512.76g/kg)、细根最低(444.64g/kg);刺槐各器官 N 含量以叶最高(39.40g/kg)、枝最低(14.64g/kg),油松则以叶最高(10.53g/kg)、皮最低(2.31g/kg);两树种各器官的 P 含量均以叶最高(2.03g/kg,0.83g/kg)、皮最低(0.38g/kg,0.12g/kg)(表 2)。刺槐各器官 C 含量显著低于油松,N 含量则相反。除粗根 P 含量与油松差异不显著外,其余各器官 P 含量均显著高于油松。

刺槐各器官 C∶N 以干最高(29.99)、粗根最低(10.79),油松则以皮最高(218.69)、叶最低(48.21);刺槐各器官 N∶P 以皮最高(53.78)、叶最低(19.47),油松则以细根最高(18.68)、粗根最低(3.42)。两树种各器官 C∶P 均以皮最高(1211.21,3892.94),叶最低(210.13,606.88)(表 2)。刺槐干 N∶P 与油松差异不显著,其余各器官 C∶N、C∶P、N∶P 均表现出显著的差异性,其中油松 C∶N 和 C∶P 显著大于刺槐,N∶P 显著小于刺槐。

表 2　刺槐和油松乔木层各器官 C、N、P 含量及化学计量比(平均值±标准误)

Table 2　Organs of arbor C, N, P concentrations and their ratios within *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* (mean±SE)

器官 Organ	C/(g/kg)		N/(g/kg)		P/(g/kg)	
	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*
叶 Leaf	426.23±12.79b	505.30±0.54a	39.40±0.98a	10.53±0.52b	2.03±0.08a	0.83±0.02b
枝 Branch	417.49±8.81b	512.76±4.33a	14.64±0.37a	4.40±0.16b	0.41±0.01a	0.35±0.03b
干 Trunk	425.42±5.68b	486.46±14.45a	15.06±2.27a	2.79±0.84b	0.52±0.01a	0.23±0.01b
皮 Bark	457.12±8.76b	487.51±3.65a	20.38±2.12a	2.31±0.28b	0.38±0.01a	0.12±0.01b
细根 Fine root	308.27±8.96b	444.64±7.33a	25.22±0.03a	5.20±0.45b	0.66±0.01a	0.28±0.00b
粗根 Thick root	400.39±3.97b	466.01±7.36a	37.47±2.66a	2.51±0.36b	0.79±0.05a	0.74±0.02a
器官 Organ	C∶N		C∶P		N∶P	
	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*
叶 Leaf	10.83±0.46b	48.21±2.26a	210.13±9.67b	606.88±13.01a	19.47±1.18a	12.67±0.90b
枝 Branch	28.53±0.34b	116.80±3.37a	1015.26±27.67b	1617.33±31.98a	35.61±1.23a	13.88±0.62b
干 Trunk	29.99±5.75b	173.48±40.33a	812.23±17.28b	2146.33±34.98a	28.96±4.94a	13.87±3.28a
皮 Bark	23.07±3.09b	218.69±29.37a	1211.21±41.00b	3892.94±57.81a	53.78±4.79a	18.34±2.01b
细根 Fine root	12.22±0.36b	86.85±8.25a	467.16±11.22b	1598.85±37.15a	38.24±0.27a	18.68±1.48b
粗根 Thick root	10.79±0.71b	192.17±21.80a	508.77±28.33b	633.31±24.92a	47.23±0.76a	3.42±0.57b

相邻两列同行不同小写字母表示不同树种同一器官差异显著(P<0.05)

2.2　林下植物与枯落物 C、N、P 含量及化学计量比

刺槐林下灌叶和灌枝 C 含量与油松无显著差异,但灌根 C 含量显著大于油松。刺槐与油松灌木各器官 N、P 含量均有显著差异,除刺槐林下灌叶 P 含量显著小于油松外,其余各器官均表现为刺槐大于油松(表 3)。刺槐林下灌木各器官 C∶N 均显著小于油松,灌枝和灌根 C∶P 也显著小于油松,但灌叶 C∶P、N∶P 却显著大于油松。另外,灌枝和灌根 N∶P 与油松无显著性差异(表 3)。

刺槐林内草叶和草根 C 含量均显著小于油松,草叶和草根 N、P 含量均显著大于油松。刺槐林内草叶和草根 C∶N、C∶P 均显著小于油松,而草根 N∶P 与油松无显著差异,草叶 N∶P 显著大于油松(表 3)。

刺槐林下枯落物 C 含量显著小于油松,N 含量和 P 含量显著大于油松,与刺槐和油松叶片的关系表现出一致性。刺槐林下枯落物 C∶N、C∶P 均显著小于油松,但两者之间 N∶P 无显著差异(表 3)。

表 3 刺槐和油松林下植物与枯落物 C、N、P 含量及化学计量比(平均值±标准误)

Table 3 Undergrowth and litterl C, N, P concentrations and their ratios within *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* (mean±SE)

器官 Organ	C/(g/kg)		N/(g/kg)		P/(g/kg)	
	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*
灌叶 Shrub leaf	406.19±3.74a	404.56±4.51a	22.35±0.21a	9.62±0.33b	1.24±0.06b	1.55±0.05a
灌枝 Shrub branch	409.46±9.01a	424.37±4.94a	10.14±0.12a	7.06±0.08b	0.67±0.01a	0.46±0.01b
灌根 Shrub root	418.93±3.04a	396.77±3.19b	10.15±0.01a	3.72±0.13b	0.71±0.01a	0.25±0.01b
草叶 Herb leaf	385.74±2.77b	440.39±1.36a	29.95±0.26a	14.44±0.63b	1.59±0.07a	0.89±0.00b
草根 Herb root	241.40±1.35b	251.60±1.89a	13.41±0.69a	7.36±0.30b	0.90±0.01a	0.53±0.02b
枯落物 Litter	369.00±4.66b	461.89±4.86a	18.75±0.48a	6.68±0.59b	0.88±0.05a	0.35±0.01b

器官 Organ	C∶N		C∶P		N∶P	
	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*	刺槐 *Robinia*	油松 *Pinus*
灌叶 Shrub leaf	18.17±0.15b	42.18±1.99a	329.55±16.73a	261.37±5.80b	18.14±0.99a	6.24±0.41b
灌枝 Shrub branch	40.39±0.41b	60.13±0.20a	609.66±16.86b	919.84±24.93a	15.09±0.28a	15.30±0.42a
灌根 Shrub root	41.26±0.34b	106.72±2.88a	590.90±4.98b	1585.65±10.59a	14.32±0.18a	14.88±0.38a
草叶 Herb leaf	12.88±0.03b	30.61±1.32a	243.82±8.74b	493.20±2.48a	18.93±0.64a	16.18±0.74b
草根 Herb root	18.12±1.08b	34.27±1.09a	269.67±4.37b	477.18±16.58a	14.96±0.62a	13.92±0.11a
枯落物 Litter	19.71±0.73b	70.21±6.32a	421.30±18.74b	1307.01±36.01a	21.49±1.67a	18.92±1.75a

相邻两列同行不同小写字母表示不同树种同一器官及枯落物差异显著(P<0.05)

2.3 土壤层 C、N、P 含量及化学计量比

刺槐和油松林下土壤中 C、N 含量均随土壤深度增加而减少,而 P 含量则基本保持不变(图 1)。不同人工林类型表现为油松各土层 C 含量均高于刺槐,其中在 10—20、20—30cm 土层中两者表现显著差异(图 1)。在 10—20cm 土层中油松土壤内 N 含量显著大于刺槐,而其余各土层中,两者之间 N 含量未表现出显著差异。两者在所有土层中的 P 含量间也未表现出显著差异。刺槐和油松土壤 C∶N、C∶P、N∶P 均呈现出随土层深度增加而减小的趋势。在 0—10cm 中刺槐土壤 C∶P 与油松差异不显著,其余各土层中两者土壤 C∶P 均表现出显著性差异,且刺槐土壤 C∶P 小于油松。各土层中刺槐土壤 C∶N 均显著小于油松。但在 0—20cm 土层中,刺槐土壤 N∶P 显著小于油松,而其余各土层中两者之间均未表现出显著性差异。

2.4 乔、灌、草叶和枯落物与土壤层 C、N、P 含量和化学计量比之间的关系

本研究对刺槐和油松人工林中乔叶、灌叶、草叶、枯落物与土壤 C、N、P 含量和化学计量比之间进行了相关性分析,其中在 0—10cm 土层中刺槐人工林各组分与土壤无显著性相关,而油松人工林中的乔叶 C∶N 与土壤表现出极显著的负相关,草叶 C∶N 与土壤表现出显著的正相关。在 10—20cm 土层中,刺槐乔叶 N 与土壤表现出显著正相关,乔叶和枯落物 P 与土壤表现出显著负相关,草叶 C∶P 与土壤表现出显著负相关;而油松仅有枯落物 N 与土壤表现出显著负相关。20—30cm 土层中,仅有刺槐人工林中组分与土壤表现出相关性,其中草叶 N 以及乔叶和枯落物 P 与土壤表现出显著负相关,灌叶 C∶P 与土壤表现出显著正相关;而油松各组分与土壤并未表现出相关性。30—50cm 土层中,刺槐林下灌叶 C∶N 与土壤为显著负相关,油松乔叶 C 与土壤为显著正相关。50—100cm 土层中,只有刺槐林下灌叶和油松草叶 C∶P 与土壤表现为显著正相关,其他各组分均未表现出相关性(表 4)。

3 讨论

3.1 刺槐与油松 C、N、P 含量及化学计量比特征

C、N、P 等元素是植物生长发育所必需的营养元素,其中 C 是构成植物体干物质最主要的元素,N 和 P 则是植物生长的主要限制性元素。本研究中,刺槐乔木各器官 C 含量显著小于油松。其中刺槐叶片 C 平均含量(426.23g/kg)(表 2)小于 Elser 等[2] 研究的全球植物叶片 C 平均含量(464g/kg),也小于 Zheng 和 Shangguan[12] 研究的我国黄土高原植被叶片 C 平均含量(438g/kg);油松叶片 C 平均含量(505.30g/kg)(表 2)

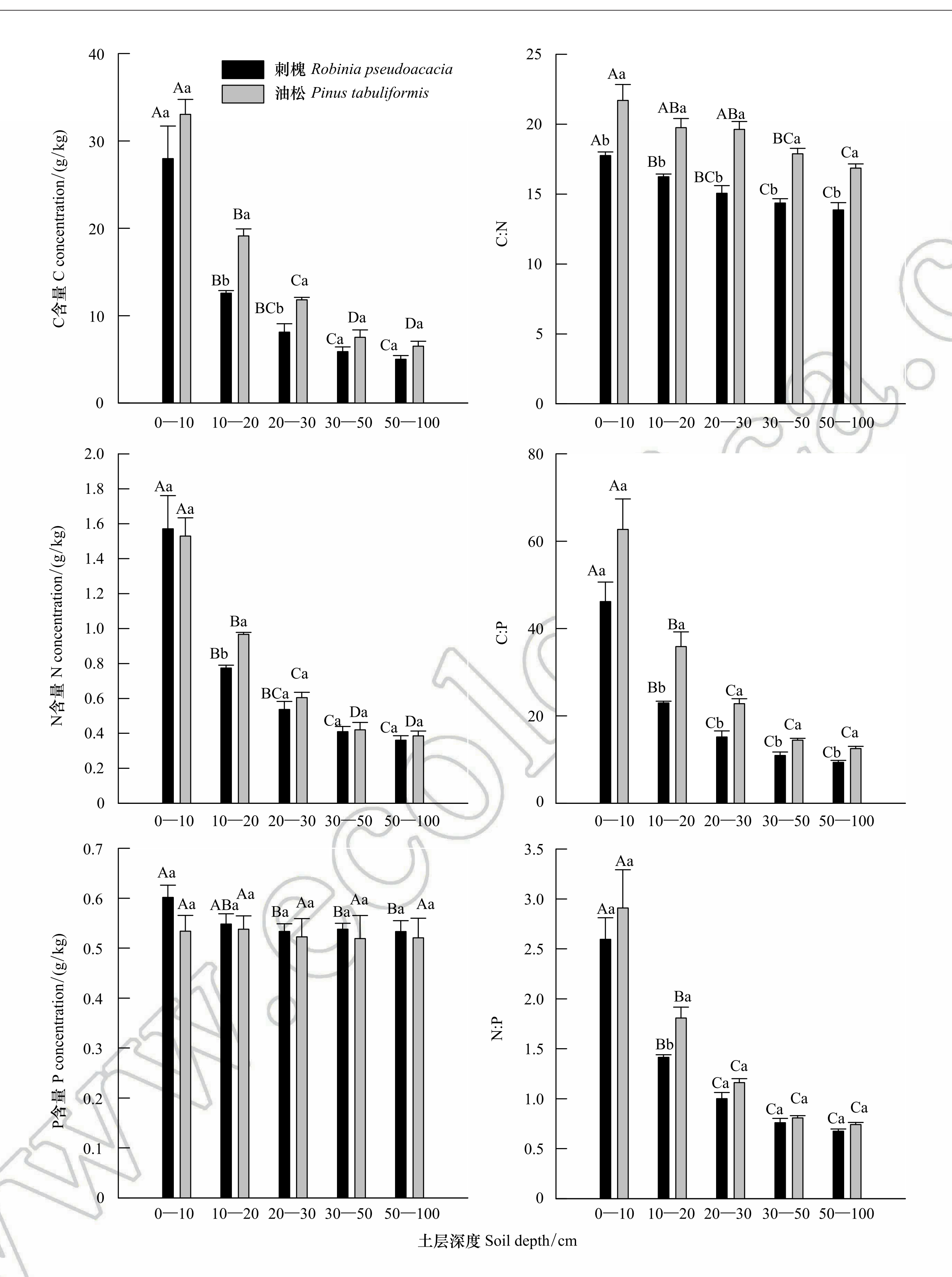


图 1　刺槐和油松林土壤层 C、N、P 含量及化学计量比(平均值±标准误)

Fig.1　Soil C, N, P concentrations and their ratios within *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* (mean±SE)

不同大写字母表示同一树种土壤层不同深度差异显著,不同小写字母表示不同树种土壤层同一深度差异显著(P<0.05)

则大于以上的研究水平。研究表明,C 含量越高,植物物质中有机物的含量越高[13]。因此可认为本研究区中刺槐叶片的有机化合物含量低于油松叶片的有机化合物含量,这与全球范围内针叶树种叶片有机化合物含量高于阔叶树种研究结果一致[14-15]。叶片作为植物重要的养分器官,其 N、P 含量远远大于乔木层植被中其他

表 4 乔、灌、草叶和枯落物与土壤 C、N、P 含量和化学计量比相关性

Table 4 Relationships among arbor leaf, shrubleaf, herb leaf, litter and soil C,N,Pconcentrations and their ratios

土层深度 Soil depth/cm	元素 Element	刺槐 *Robinia*	相关系数 Correlation coefficient	元素 Element	油松 *Pinus*	相关系数 Correlation coefficient
0—10	C∶N	乔叶与土壤	0.317	C∶N	乔叶与土壤	−0.859**
		草叶与土壤	−0.045		草叶与土壤	0.893*
10—20	N	乔叶与土壤	0.764*	N	枯落物与土壤	−0.727*
	P	乔叶与土壤	−0.683*	P	乔叶与土壤	−0.075
		枯落物与土壤	−0.765*		枯落物与土壤	0.831
	C∶P	草叶与土壤	−0.883*	C∶P	草叶与土壤	0.031
20—30	N	草叶与土壤	−0.926*	N	草叶与土壤	−0.057
	P	乔叶与土壤	−0.876*	P	乔叶与土壤	−0.308
		枯落物与土壤	−0.871*		枯落物与土壤	0.676
	C∶P	灌叶与土壤	0.784*	C∶P	灌叶与土壤	0.680
30—50	C	乔叶与土壤	−0.570	C	乔叶与土壤	0.783*
	C∶N	灌叶与土壤	−0.853*	C∶N	灌叶与土壤	0.886
50—100	C∶P	灌叶与土壤	0.926*	C∶P	草叶与土壤	0.827*

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

各器官。本研究中刺槐叶片 N 平均含量(39.40g/kg)(表 2)大于 Reich 和 Oleksyn[16] 以及 Elser 等[2] 研究的全球植物叶片 N 平均含量(20.09g/kg,20.62g/kg),也大于 Han 等[17] 研究的中国植物叶片 N 平均含量(20.24g/kg);而油松叶片 N 平均含量(10.50g/kg)(表 2)小于以上研究的 N 平均含量。因为刺槐为外来引进的落叶固氮树种,作为豆科植物具有强大的固氮能力[18],而油松是本土具有适应性的针叶树种,固氮能力相对较弱。刺槐叶片 P 平均含量(2.03g/kg)(表 2)大于 Ren 等[19] 研究的中国植物叶片 P 平均含量(1.56g/kg),也大于我国黄土高原植被叶片 P 平均含量(1.60g/kg)[12];油松叶片 P 平均含量(0.83g/kg)(表 2)小于以上研究中 P 平均含量。此外,刺槐乔、灌木各器官 N、P 含量也大于油松,这与以往的研究结果(Han 等[17];崔高阳等[20];姜沛沛等[10])基本一致。研究表明,固氮植物在 P 限制环境下,吸收 P 的能力将会得到提升[21]。本研究中固氮树种刺槐生长主要受 P 限制(表 2),在 N 含量较高的情况下促进了对 P 的吸收利用,从而导致刺槐各器官 P 含量均高于油松。而导致两树种林下灌木各器官化学计量特征的差异,可能是由于灌木物种本身差异引起,也可能是由于不同人工林群落之间的差异造成,还有待进一步研究。刺槐和油松林下枯落物的 C、N、P 化学计量特征基本与乔、灌、草叶片的 C、N、P 化学计量特征表现一致,究其原因是由于枯落物直接来源于叶片,因此枯落物与叶片 C、N、P 含量表现出一致性。

C∶N 和 C∶P 作为重要的生理指标能够反映植物生长的速度,一般认为低的 C∶N 和 C∶P 表征植物具有较快的生长速率[22]。本研究中刺槐和油松叶片 C∶N 和 C∶P 低于其他各器官,原因是各器官 C 含量差异不大,而 N、P 含量则显著大于其他各器官。另外,刺槐各组分 C∶N 和 C∶P 都显著小于油松。这说明相比油松林而言,刺槐林具有更高的生长速率[22]。植物叶片 N∶P 作为一项重要指标可以反映环境对植物生长养分供应状况。研究表明,植物叶片 N∶P<14,植物生长受 N 限制;N∶P>16,植物生长主要受 P 限制;14<N∶P<16,植物生长受 N 和 P 共同限制[23]。本研究中刺槐乔叶 N∶P 为 19.47(表 2),油松乔叶 N∶P 为 12.67(表 2),这表明刺槐生长主要受 P 限制,油松生长主要受 N 限制。还有研究表明,枯落物中 C∶N 和 N∶P 是影响其分解速率和养分归还速率的重要因素,尤其是较低的 C∶N 使枯落物更容易分解,不利于养分的存储[6,24]。本研究中,刺槐林下枯落物 C∶N(19.71)小于油松(70.21)(表 3),这表明油松林下枯落物相对刺槐林下枯落物来说更不容易分解,且更有利于养分的存储。因此,在黄土高原区油松林下枯落物可减缓水土流失,涵养土壤,说明油松是优良的水土保持树种。

3.2 土壤层 C、N、P 含量及化学计量比特征

由于土壤对 P 的吸附作用以及黄土高原区地表水土流失严重和强烈的风化作用,研究区中土壤 P 平均

含量(0.54g/kg)明显低于黄土高原中部刺槐林土壤 P 平均含量(1.12g/kg)[4] 和全球平均水平(2.80g/kg)[25]。这与中国土壤 P 含量普遍低于全球平均水平的规律一致[25-26]。本研究中,刺槐和油松人工林土壤 C、N 含量随土层深度增加而减少(图 1),P 含量则基本保持不变。这与土壤层中 C、N、P 来源差异有关[11]。土壤中 C、N 的获得途径多样,主要源自枯落物和植物根系分解形成的有机质,其中 N 元素还源自大气沉降。枯落物残体和植物根系主要分布于土壤表层,并随着土层深度的增加而减少,所以 N 含量也随着土层深度增加而减少。土壤中 P 的获取途径相对单一,主要源于岩石的风化和淋溶,并且 P 元素作为一种沉积性的矿物,在土壤中迁移相对较少,因此 P 在整个土层中分布比较均匀[20]。由于刺槐和油松人工林土壤 C、N 含量均随土层深度增加而减少,故而土壤中 C:P、N:P 也随着土壤深度的增加而减小(图 1)。另外,本研究中,刺槐人工林土壤中 C 含量低于油松,但 N、P 含量在两者土壤中并无较大差异,这与刺槐人工林土壤中枯落物分解较快以及积累的少量的土壤有机物质有关[27]。

有研究表明,土壤中有机质 C:N 与其分解速度呈反比关系[11]。本研究中刺槐人工林土壤中 C:N 显著小于油松,这说明土壤中刺槐的植物残体矿化和腐殖化都较易进行,分解较快;而油松则相反。土壤 C:P 是表示 P 有效性高低的一个指标,较低的 C:P 表示 P 有效性高[11,28]。本研究区刺槐人工林土壤 C:P 小于油松(图 1),因此可认为刺槐林地土壤 P 有效性更高。土壤 N:P 可作为营养元素限制状况判断的指标[11],而在本研究区中刺槐与油松人工林土壤 N:P 并未表现出特别显著的差异性(图 1),这说明其适用范围和临界阈值本身具有一定的局限性并且会随生态系统和环境的条件改变而发生变化,这在未来的实验中还需进一步的观察与分析。

3.3　乔、灌、草叶和枯落物与土壤层 C、N、P 含量和化学计量比之间的关系

植物叶片、枯落物和土壤的 C、N、P 化学计量特征存在着密切的关系。植物通过根系从土壤吸收各种所需元素,然后以植物残体的形式返还给土壤,说明了生态系统内部的 C、N、P 等元素循环是在植物-枯落物-土壤 3 个库之间运输和转换的[29]。研究表明,植物叶片 P 含量与土壤 P 含量密切相关[9],这与本研究中刺槐叶片 P 含量与土壤 P 含量密切的相关性一致,并且表现出显著的负相关(表 4)。本研究还发现,刺槐林中乔叶和草叶 N 含量与土壤中 N 含量具有相反的相关性,油松林中乔叶和草叶 C:N 与土壤 C:N 也是如此。这说明群落不同层次植物的养分特征与土壤养分特征间具有不同的关系。此外,刺槐林内植物叶片和枯落物与土壤营养元素的相关性多集中在 10—20cm 和 20—30cm 土层(表 4),而油松植物叶和枯落物与土壤营养元素的相关性相对较小,其中在 20—30cm 土层中并无显著相关性(表 4)。植物通过根系从土壤中吸收营养元素,而刺槐根系中直径大于 10mm 的根在 0—10cm 土层中分布较少,主要集中分布在 10—60cm 土层范围内[30],并且土壤表层中土壤含水量相对较低,植物与土壤间营养元素循环相对较弱,可能致使刺槐植物叶片和枯落物与土壤养分相关性在 0—10cm 土层中不显著。油松作为常绿针叶林植物,其土壤中植物残体分解能力差和根系分布特点与刺槐并不相同[30],因此油松植物叶和枯落物与土壤营养元素的相关性相对较小,表明相比刺槐人工林而言,油松人工林内土壤层 N、P 供应量对植物叶片 N、P 含量影响不显著。另外,植物与土壤 C、N、P 化学计量特征的相关性还可能与研究区土壤环境,人为干扰程度等有关[31]。植物-枯落物-土壤 C、N、P 化学计量特征之间的相关分析,对于揭示 C、N、P 元素在整个生态系统中的变化格局以及 C、N、P 平衡和养分机制都有着重要的作用,而把植物-枯落物-土壤作为一个整体来探讨的研究还待进一步加强。

4　结论

陕北黄土丘陵区宜川县境内的刺槐与油松人工林生态系统 C、N、P 含量间存在着显著的差异,其中油松叶片 C 含量显著大于刺槐叶片,但 N、P 含量却显著小于刺槐叶片。此外,刺槐各组分 C:N 和 C:P 都显著小于油松各组分,这说明相比油松林而言,刺槐林具有更高的生长速率。本研究区中油松林下枯落物 C:N 大于刺槐林下枯落物,表明油松林下枯落物较刺槐林下枯落物分解较慢,有利于养分的存储。刺槐和油松人工林植被不同组分与土壤 C、N、P 含量和化学计量比之间的相关性分析表明,不同类型人工林生态系统不同层次

植物与土壤养分特征间具有不同的关系,而对于把植物-枯落物-土壤作为一个整体来探讨的研究还不完善,需要更深入的研究。本研究丰富了西北地区乃至全国的 C、N、P 化学计量特征数据库,为了解黄土丘陵区生态系统养分耦合循环机制奠定了基础。

参考文献(References):

[1] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment.American Scientist, 1958, 46(3): 205-221.

[2] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L W. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.

[3] 王俊波, 马安平, 王得祥, 吕婧娴. 我国人工林经营现状与健康经营途径探讨//2008 年(第十届)中国科协年会论文集. 郑州: 中国科学技术协会, 2008.

[4] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 党廷辉, 安韶山. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究. 土壤学报, 2014, 51(1): 133-142.

[5] 马露莎, 陈亚南, 张向茹, 杨佳佳, 安韶山.黄土高原刺槐叶片生态化学计量学特征. 水土保持研究, 2014, 21(3): 57-67.

[6] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 杨佳佳, 安韶山. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422.

[7] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的 C:N:P 化学计量学特征. 植物生态学报, 2011, 35(6):587-595.

[8] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998: 173-176.

[9] 侯庆春, 黄旭, 韩仕锋, 张孝忠. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究——Ⅱ土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系. 水土保持学报, 1991, (2): 75-83.

[10] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 赵一娉. 陕西省 3 种主要树种叶片、凋落物和土壤 N、P 化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(2): 443-454.

[11] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.

[12] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. Trees, 2007, 21(3): 357-370.

[13] 鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 宋国宝, 杨晓慧, 吕海燕. 植物热值及其生物生态学属性. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1095-1103

[14] Thomas S C, Martin A R. Carbon Content of Tree Tissues: A Synthesis. Forests, 2012, 3(2): 332-352.

[15] Zhang Q Z, Wang C K, Wang X C, Quan X K. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. Forest Ecology and Management, 2009, 258(5): 722-727.

[16] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.

[17] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[18] Bolat I, Kara Ö, Sensoy H, Yüksel K. Influences of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L) afforestation on soil microbial biomass and activity. IForest-Biogeosciences and Forestry, 2015, 9: 171-177.

[19] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.

[20] 崔高阳, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征. 植物生态学报, 2015, 39(1): 1146-1155.

[21] Li X W, Sun K, Li F Y. Variation in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in the nitrogen-fixing Chinese sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi) across northern China. Ecological Research, 2014, 29(4): 723-731.

[22] Ågren G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-Theory and observations. Ecology Letters, 2004, 7(3): 185-191.

[23] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.

[24] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.

[25] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, Wang S Q, Liu M L, Pan S F, Shi X Z. Pools and distributions of soil phosphorus in China. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): GB1020.

[26] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第一卷). 北京: 中国农业出版社, 1993:1-924.

[27] Song B L, Yan M J, Hou H, Guan J H, Shi W Y, Li G Q, Du S. Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semiarid region of the Loess Plateau, China. Catena, 2016, 143: 159-166.

[28] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.

[29] Mcgroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios. Ecology, 2004, 85(9): 2390-2401.

[30] 刘秀萍, 陈丽华, 陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究. 干旱区研究, 2007, 24(5): 647-651.

[31] 曹建华, 李小波, 赵春梅, 蒋菊生, 谢贵水. 森林生态系统养分循环研究进展. 热带农业科学, 2007, 27(6): 68-79.